

XUAN
YA
JI
SHU

王成和 刘克璋等 编著

旋压技术

机械工业出版社

本书主要根据国内外有关技术文献和结合作者技术实践与见解编写而成。叙述了金属旋压技术发展概况、特点、成型的基本方式、旋压设备、金属旋压工艺和工艺参数选择、应用实例以及理论分析与试验研究等内容。

本书可供从事金属旋压和压力加工方面工作的工程技术人员及高等院校师生参考。

旋 压 技 术

王成和 刘克璋等 编著

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 47 3/4·字数 1178 千字

1986年5月北京第一版·1986年5月北京第一次印刷

印数 0,001—2,800·定价 11.20 元

统一书号：15033·5875

前 言

金属旋压中普通旋压是我国一项发明，并是具有悠久历史的工艺技术，而强力施压却是本世纪五十年代以后国外在此基础上迅速发展起来的。这种成形技术具有变形条件好、制品性能高、尺寸公差小、材料利用率高、制品范围广、可制成整体无缝空心回转体零件等优点。它已经在各先进工业国家的工业部门中显示出其先进性、实用性和经济性。值得指出的是，旋压技术和设备成功地应用，不仅促进了航空、火箭、导弹和人造卫星等尖端技术的发展，而且在常规兵器、化工、冶金、机械制造、电子以及轻工民用等工业部门中，一种量大面广的技术装备和产品。也就是说，它已作为一项新技术与传统工艺方法并行地发展着，并且已形成近代金属压力加工的一个新领域。

目前，国外旋压技术已趋成熟完善的发展阶段，不论在其工艺研究、设备设计和制造，还是理论研究和应用等方面都有很大的发展。我国旋压技术自六十年代初以来也得到了一定发展，具有一定科研技术队伍和生产能力，但仍不能适应我国国民经济发展的需要，与国外相比尚存在较大的差距，因此，有待我们进一步努力研究和推广。

鉴于目前国内尚缺乏较全面和系统地介绍现代金属旋压技术的书籍，我们较详尽地搜集了国内外60~80年代有关旋压技术的资料，去其糟粕，取其精华，再结合作者从事该项技术实践和见解，编写了这本“旋压技术”。此书若能为广大从事旋压技术工作的工程技术人员攀登科学技术高峰筑起一个小小台阶，那就是我们最大的欣慰。

在编写过程中，我们本着理论与实践相结合的原则，把本书分为七章：第一章，概况；第二章，旋压成形的基本方式及主要派生旋压法；第三章，旋压设备；第四章，旋压机的设计；第五章，金属旋压工艺；第六章，旋压理论分析与试验研究；第七章，旋压加工实例。另外，我们深知有实用价值的工艺方案图和设备结构图常常能使读者思路顿开，激发起人们创新的“灵感”，因此力图使本书图文并茂。

本书得到有关单位的大力协助，并承蒙全国锻压学会旋压委员会主任白明本同志认真审阅和热忱支持下完成的。书中第四章第八节，旋压机的液压系统设计，由杨仁霖同志编写，第九节，旋压机的电力拖动和自动控制系统，由陶青荣同志编写，此外，还有许多兄弟单位同志给予热情支持和提供了有关资料，在此深表谢意。

由于我们水平有限，经验不足，在书中一定存在不少错误或不妥之处，恳切地欢迎读者批评指正。

编 者

名词与符号

〈主要适用于第五、六章〉

毛坯厚度	t_0	旋压轴向分力	P_a
毛坯外径 (半径)	$D_0(R_0)$	旋压切向分力	P_t
毛坯内径 (半径)	$d_0(r_0)$	接触单位压力	p
毛坯长度	L_0	旋压变形扭矩	M_d
工件壁厚	t_f	旋压变形功率	N
工件外径 (半径)	$D_f(R_f)$	单位变形功	W
工件内径 (半径)	$d_f(r_f)$	主轴电动机力矩	M_D
工件长度	L	主轴或工件的角速度	ω
芯模直径 (半径)	$d(r)$	材料抗拉强度	σ_b
壁厚绝对减薄量	Δt	材料屈服极限	$\sigma_s, \sigma_{s.2}$
壁厚减薄率	ψ_t	材料平均屈服极限	$\bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_m$
对正弦律的偏离率	Δ^s	径向应力 (极坐标)	σ_r
锥形件 (芯模) 的半锥角	α	切向应力 (极坐标)	σ_φ
预制锥形坯的半锥角	β	剪应力 (极坐标)	$\tau_{r\varphi}$
旋轮与芯模间间隙	$\Delta (c_0)$	垂直屈服应力	σ_s
旋轮直径 (半径)	$D_p(R_p)$	拉应力	$\sigma_{拉}, \sigma_{\sigma}$
旋轮工作圆角半径	r_p	压应力	$\sigma_{压}$
旋轮接触角	α_p	真实变形抗力	σ_d
旋轮趋近角	α'_p	剪切屈服应力	k
旋轮压光角	β_p	拉伸应变	ε
旋轮退出角	β'_p	剪应变	γ
修光带宽度	$l_{\text{修}}$	拉伸应变速度	$\dot{\varepsilon}$
旋轮压下台阶高度	$h_p (= \Delta t)$	剪应变速度	$\dot{\gamma}$
旋轮对毛坯的攻角	δ	拉伸断面收缩率	ψ^t
旋轮数目	m_p	材料弹性模数	E
旋轮进给量	f	摩擦系数	μ
旋轮进给速度	v_f	材料密度	ρ
主轴或工件转速	n	旋轮与工件的接触面积	F
旋压切线速度	v_t	接触面积的径向投影	F_r
锥形件旋压系数	m	接触面积的轴向投影	F_a
总旋压力	P	接触面积的切向投影	F_t
旋压径向分力	P_r	模拟比例系数	m_p

目次

前言

术语与符号

第一章 概况.....1

第一节 国内外旋压技术的发展.....1

第二节 旋压工艺的特点.....5

第三节 旋压技术的应用.....13

一、可旋压的材料.....13

二、可旋压的零件形状.....13

三、旋压加工和其他工艺的联合应用.....22

第二章 旋压成型的基本方式

及主要派生旋压法.....27

第一节 普通旋压的基本方式.....27

一、拉深旋压.....27

二、缩径旋压.....35

三、扩径旋压.....39

四、普通旋压中的辅助成形.....41

第二节 强力旋压的基本方式.....44

一、剪切旋压.....44

二、挤出旋压.....47

第三节 主要派生旋压法.....52

一、超声波旋压法.....52

二、通用芯模旋压法.....54

三、内旋压法.....55

四、行星旋压法.....56

五、斜轧式旋压法.....60

六、张力旋压法.....60

七、钢球旋压法.....63

八、多旋轮的错距旋压法.....66

九、劈开旋压法.....68

十、环形旋轮旋压法.....68

十一、摩擦工具旋压法.....70

十二、加热旋压法.....72

十三、射流旋压法.....73

第三章 旋压设备.....74

第一节 旋压机的分类.....74

第二节 各类旋压机的结构特点.....89

一、机床型旋压机.....89

二、轧机型强力旋压机.....171

三、压力机型旋压机.....181

四、特殊型强力旋压机.....187

第四章 旋压机的设计.....201

第一节 旋压机设计的原则和步骤.....201

一、旋压机设计的一般原则.....201

二、旋压机的设计步骤.....202

第二节 旋压工艺对设备的要求

和设备的一般特点.....206

一、旋压工艺对设备的要求.....206

二、旋压机的一般特点.....209

第三节 旋压机的布局和其结构形式.....210

一、旋压机的总体布局.....210

二、旋压机的结构形式.....212

第四节 旋压机的主轴传动.....218

一、旋压机的各种运动的联系方式.....218

二、主轴变速箱.....221

第五节 旋压机的纵向进给传动.....259

一、进给箱的功用和要求.....259

二、旋压机进给箱的基本形式.....259

三、旋压机进给箱中变速、

换向和牵引机构.....264

四、进给箱的计算.....273

第六节 旋轮座和尾座.....289

一、旋轮座.....289

二、尾座.....312

第七节 旋压机床身装置和导轨.....317

一、床身装置.....317

二、导轨.....326

第八节 旋压机的液压系统设计.....336

一、液压传动和控制系统的优缺点.....336

二、液压传动和控制系统的的设计.....337

三、设计计算举例.....376

四、动力站的结构设计.....400

第九节 旋压机的电力拖动

和自动控制系统	402	三、卡车和客车车轮轮辋旋压的 工艺流程	522
一、概述	402	四、各种圆筒旋压的工艺流程	530
二、电力拖动形式与选择	402	五、各种封头旋压的工艺流程	533
三、控制系统	407	第九节 旋压制品的精度	537
四、电气控制系统应用举例	424	第十节 旋压件的缺陷、产生的原因 及其防止措施	541
第五章 金属旋压工艺	438	第十一节 旋压过程中毛坯凸缘的失稳	543
第一节 旋压工艺方案的选择	438	第十二节 强力旋压中防止金属的 粘结措施	546
一、旋压方式的选择	438	一、在润滑剂中添加抗粘剂	547
二、毛坯的处理	439	二、涂覆表面保护层	547
三、旋压设备的选用	439	三、采取适当的工艺措施	548
第二节 毛坯种类和对毛坯的要求	440	第十三节 旋压中金属堆积现象	548
一、毛坯种类	440	第六章 理论分析与试验研究	552
二、对毛坯的要求	441	第一节 变形机理的模型试验	552
第三节 毛坯的设计计算	443	一、坐标网格法	552
一、一般锥形件的毛坯计算	443	二、金属物理分析法	554
二、双锥角锥形件的毛坯计算	446	三、填孔法	555
三、双向锥形件的毛坯计算	446	第二节 金属材料的可旋性试验	556
四、同心阶梯锥形件的毛坯计算	446	一、锥形件的可旋性试验	556
五、曲母线形件的毛坯计算	448	二、筒形件的可旋性试验	565
六、曲母线形件的不等厚度毛坯计算	449	第三节 锥形件旋压力的计算	570
七、封头的毛坯计算	450	一、一般问题	570
八、筒形件的毛坯计算	454	二、锥形件强力旋压力的计算	577
九、毛坯设计计算实例	455	三、锥形件强力旋压功率的计算	608
第四节 旋压过程工艺参数的选择	462	第四节 筒形件旋压力的计算	613
一、减薄率	462	一、一般问题	613
二、主轴转速或旋速	465	二、筒形件强力旋压力的计算	624
三、芯模和旋轮的间隙	465	第五节 尾座顶紧力的计算	672
四、进给量或进给速度	467	一、一般顶紧力的计算	672
五、旋轮安装角	467	二、参与工件成形顶紧力的计算	675
六、旋压温度	467	第六节 影响旋压力的因素	676
第五节 旋压道次规范和旋轮运动轨迹	468	一、锥形件强力旋压	677
一、影响旋压道次规范的因素	468	二、筒形件强力旋压	683
二、旋轮运动轨迹的计算和作图	470	第七节 旋压力能的试验研究	688
三、一些典型的旋轮运动轨迹	472	一、旋压力能的电测试验	688
第六节 金属旋压的润滑和冷却	475	二、旋压过程的模拟实验	711
第七节 工艺装备的设计	477	第七章 旋压加工实例	718
一、主要工艺装备	477	参考文献	753
二、辅助工艺装备	510		
第八节 典型旋压工艺流程	517		
一、车辆轮辐旋压的工艺流程	517		
二、气瓶旋压的工艺流程	521		

第一章 概 况

第一节 国内外旋压技术的发展

根据文献记载,我国远在公元前三千五百年到四千年的殷商时代,就已采用陶轮(或陶车)制作陶瓷制品。这种制陶工艺发展到约十世纪初就孕育出了金属普通旋压工艺。当时已将金属(如银、锡和铜等)薄板旋压成各种瓶、罐、壶和盘等容器、器皿和装饰品。又过了许多年,直到十三世纪,这种技术才传到英国和欧洲各国。1840年前后,旋压技术由约旦(Jordan)传到美国。在18世纪60年代末期,德国才出现了第一个金属旋压技术的专利。

普通旋压工艺在国内外长期处于落后状态,最古老的旋压设备由人力驱动,使用棒形工具使坯料成形。后来,旋压机又借助于水力和蒸汽动力驱动。随着工业技术的进步,尤其是电动机的出现,旋压机的主轴逐步采用电机驱动,旋压工具也由木质擀棒逐渐改用金属旋轮。在电动旋压机出现前很长时期中,旋压技术赶不上用模具冲压技术的发展,因此,其应用范围有限,即只用于小批量生产和加工较软金属材料的零件。在电动旋压机出现之后,旋压技术有了重大的突破,其应用范围和加工能力大大扩大和提高了。

在20世纪中叶以后,普通旋压有了如下三个方面的重大进展:一是,普通旋压设备逐渐机械化,在50年代出现了模拟手工旋压的设备,即采用液压助力器等驱动旋轮往复移动,以实现进给和回程,因而减轻了操作工的劳动强度。二是,在60~70年代出现了能单向多道次进给的、电气液压程序控制的半自动旋压机。三是,由于电子工业的发展,于60年代后期,国外(首先是西德莱弗尔德公司)在自动旋压机的基础上,发展了数控(NC和CNC控制系统)和录返系统(PNC系统)的旋压机。这些成就使普通旋压技术冲破了小批量生产的限制,而应用于中批量和大批量生产中。

在普通旋压技术基础上发展起来的强力旋压法,于第二次世界大战前后开始用于欧洲(瑞典、德国)的民用工业(例如,加工锅皿等容器)。随着科学技术的发展,特别是近30多年来火箭、导弹和宇航技术的迅速发展,旋压技术已在许多国家得到惊人的发展和广泛的应用。大体上说,国外强力旋压技术的发展可分三个阶段:50年代为强力旋压技术开始应用阶段,60年代为强力旋压技术大发展阶段,70年代为强力旋压设备完善定型阶段。

根据美国AD755876报告,在技术先进的国家,已研制出大约两百多种规格的各类旋压机,其中许多已系列化。旋压设备的生产主要集中在美国、西德、苏联、日本、东德、意大利、英国和瑞士等。

美国大约从1920年开始应用手工旋压技术,1953年,美国普拉特 惠特尼(Pratt Whitney)航空发动机公司和洛奇西普来(Lodge & Shipley)公司合作设计制造了首批三台专用强力旋压机。近20多年来,随着火箭导弹和航天技术的发展,金属旋压技术已在国防和民用工业中得到广泛的应用。据不完全统计,美国1958年生产的一般旋压机为1375台,而1963年增加到2000多台。美国主要生产重型旋压机,而制造旋压机的公司有15个以上,其主要的设计制造公司有:洛奇西普来、辛辛纳特、赫福特三家。

洛奇西普来公司设计制造的旋压机有 Floturn 12 型、Floturn25 型、Floturn40 型、Floturn60型、Floturn70型、Floturn80型和卧式管材精旋压机等。其技术性能见表3-1。

辛辛纳特铣床 (The Cincinnati Milling Machine) 公司设计制造的旋压机有 Hydrospin26 型、Hydrospin32型、Hydrospin42型、Hydrospin45型、Hydrospin60型、Hydrospin62型、Hydrospin75型等，其技术性能见表3-2。

赫福特 (Hufford) 公司设计制造的旋压机有 Hufford60型、Hufford120型、Hufford166 型、Hufford171型等，其技术性能见表3-3。

另外，美国伊沟威尔 (Eagleware) 公司也设计制造了 Autospin 系列自动旋压机，并可提供自动旋压机生产线。

美国的重型旋压机，大都为立式的，结构型式较特殊，已向许多国家出口。

美国在旋压理论和工艺方面也进行了较系统的研究工作。

西德旋压技术的发展十分迅速，已经设计制造了多种规格品种的系列化旋压设备，技术先进，畅销世界50多个国家，积累了丰富的设计、制造和使用的经验，但理论研究方面的成果发表较少。

西德的旋压设备主要是中小型多用途的或专用的，而且多为卧式，近来向大型化和计算机数控方向发展。

西德设计制造旋压机的专业公司主要有：波柯 (Böko) 公司、莱弗尔德 (Leifeld) 公司、卡尔凯林豪斯 (Karl Keilinghaus) 机器和工具制造公司等。

波柯公司设计制造的旋压机系列有：3D30、3D35、3D50、D30/45、D35/50、D50/80、D82/125、P111b等。其技术性能见表3-4。

莱弗尔德公司从1921年就开始设计制造各种旋压机，迄今已有60多年的历史。该公司设计制造的旋压机系列有：PLB、VDM、BOD、ATM、APED、Leicomat、St、EN、AFM、PLB600S、APED450TF、VRM、FBF、DOB、AVS、SE等。另外还有：UDFMH 型、ABSM型、ARUB 型等。其技术性能见表3-5。

卡尔凯林豪斯机器和工具制造公司也是西德的主要旋压机设计制造公司，并生产了若干旋压机系列，主要有如下三种形式：Hydroplan20、Hydroplan35和Hydroplan60。其技术性能见表3-6。

东德也设计制造了若干旋压机系列。其中一部分旋压机的技术性能见表3-7。

日本从50年代以来对旋压技术的发展也十分重视，并从理论上进行了一系列研究。据报道，目前日本设计与制造旋压机的公司有：寺田铁工公司、三菱重工公司、富士机器制造公司、三井物产有限公司、日本主轴制造公司、日本M公司等。后三个公司设计制造的旋压机技术性能见表3-8~表3-10。

目前，日本各工业部门广泛地采用了旋压技术。据日本塑性加工学会旋压分科会曾对日本403个大中小公司的产品调查结果，用旋压法生产的制品约占所调查制品总数的一半（见表1-1~表1-2）。

苏联自50年代以来，大力发展旋压技术并对旋压技术进行了一系列理论研究工作。旋压机的数量成倍地增加。其原因多半是苏联宇航工业和军事工业发展的结果。苏联发展旋压机的特点是，把旋压技术和横轧技术、张力轧制技术结合起来。

苏联基辅机床厂和梯比里斯机床厂于50年代出产了 3P-53型和 TT-53 型旋压机。其技术

表1-1 旋压件所占比率

制 品 种 类	调 查 件 数 (件)	旋 压 件 比 率 (%)
机 械 部 件	78	37.1
照 明 器 具	36	17.1
家 庭 用 品	31	14.8
压 力 容 器	26	12.4
通 讯 机 械	13	6.2
物 理 仪 器 部 件	6	2.9
计 量 仪 器 部 件	4	1.9
乐 器	3	1.4
其 他	13	6.2
合 计	210	100.0

表1-2 不同形状的旋压件所占比率

形 状 种 类	调 查 件 数 (件)	旋 压 件 所 占 比 率 (%)
筒 形 件①	73	34.3
异 形 件	58	27.2
带 底 的 筒 形 件②	56	26.3
管 形 件	25	11.7
其 他③	1	0.5
合 计	213	100.0

① 包括优胜杯形状的。

② 包括封头。

③ 包括特种加工的滑轮。

性能见表3-12。苏联建筑、筑路和公共机械制造工艺设计研究所也设计制造了ПДО-2、ПДК-1、ПДК-2和801·079型半自动旋压机。其技术性能见表3-12。1967年前后苏联设计制造的旋压机系列见表3-13。

70年代以来，苏联又开展了将双层金属板旋压成封头，以及在同一台设备上实现旋压-冲压联合工艺的研制工作。

目前，苏联发展旋压技术的动向是：除设计制造一些特殊的专用旋压机外，主要利用现代数字程序控制的车床（例如，1И611ПФ3型、16Б16Ф3型、16К20Ф3型、16К30Ф3型、16К50Ф3型卡盘定心车床，1713Ф3型、1Б732Ф3型半自动车床，1520Ф3型、1540Ф3型立式车床，以及其他类似的车床）改装进行旋压。试验研究和生产实践表明，这种方法具有如下优点：

1. 利用各厂现有的数控车床，不要另设昂贵的自动旋压机，从而可以发挥现有设备的潜力，节约大量资金。

2. 数控车床改为旋压机容易，只需更换程序、工艺装备和工具。

3. 程序是以数字的形式编制的，所以生产准备主要由工程师们完成。而且，程序编制过程可以借助于计算机自动化。

英国旋压技术的发展情况报道的很少，但根据美国AD755876报告，英国1966年有5000多台旋压机，其中2556台才运转不到十多年。

瑞士靳尼(Jenny)压力机有限公司 60 年代设计制造的旋压机只是单旋轮强力旋压机, 70 年代开始设计制造重型三旋轮强力旋压机。为了保证坯料具有较大的变形率和变形速度, 旋压机整个结构刚性特别好。在繁重的工作条件和很大的压力下, 旋压机的床身、主轴轴承、滑轨和传动装置不会有很大变形。因此, 可旋压较厚的坯料。所有单旋轮旋压机都设有机械的和液压的仿形装置。

瑞士靳尼压力机有限公司设计制造的部份旋压机技术性能见表3-14。

瑞士豪伊斯勒(C.Haeusler)公司于1970年左右设计制造了HBM-Y型全液压封头旋压翻边机, 可进行平底封头、2:1椭圆封头和压力容器封头的旋压翻边。所使用的板坯厚度为2.4~31.8毫米, 若采用热旋可达102毫米。封头最大直径达7315毫米。

意大利波尔德里尼(Boldrini)公司于1959年开始生产封头旋压机, 70年代已生产了200个型号, 其中有RIBO30型、RIBO25型、RIBO24型、RIBO18型和RIBO10S型等。

我国强力旋压技术研究工作从六十年代初开始; 经过20多年的努力, 已获得了较大的发展。在旋压工艺、设备设计制造和理论研究及技术推广等方面都取得了很大的成绩。这项压力加工新工艺在国防、化工、冶金、电子、机械和民用等诸方面起到了越来越大的作用。旋压工艺实质也被越来越多的人所认识和掌握。许多自行设计和制造新型的、精度高、自动化程度高的旋压设备及各种专用旋压机不断涌现; 不少旋压产品已定型, 并用于国民经济有关部门中; 旋压工艺和理论分析已在各个研究院所、工厂和大专院校普遍开展起来。一些科研成果为旋压设备设计、制造、旋压工艺制订, 旋压产品加工后处理等提供了理论依据。为了加强国内这项技术交流, 成立了“全国锻压学会旋压学术委员会”的学术组织。

根据生产和科学研究的需要, 设计了各种型号的立式和卧式旋压机, 并用于工业生产中, 得到了显著经济效益。目前生产的旋压机主要是液压控制的。最近有些单位也着手设计数控和录返系统旋压机。在设备结构和控制上有的已采用了主轴无级变速与旋压线速度恒定和旋轮纵向进给不变、旋轮架静压导轨, 旋轮进给自动显示及内冷旋压等先进设施。旋压最大零件直径可达2.5米, 最大长度达8米以上, 最大旋压力为60吨力。旋压材料, 除了一般常用材料外, 还包括了钨、钼、钽、锆、铌、 β 钛合金、超高强度钢等等。其毛坯已采用了离心铸造, 电渣重熔和粉末冶金压制等生产手段生产。不少产品精度和性能已达到国外先进水平。

从80年代国内外旋压技术发展情况来看, 旋压技术和旋压机的发展动向可归纳如下:

1. 由于旋压技术和旋压设备是一种具有许多特性的压力加工工艺和设备, 因此, 它们已作为金属塑性加工学和金属加工技术的一个分支出现在科学技术领域和工业生产中。

2. 完全不用仿形板, 而用电子计算机数控系统(CNC)和录返系统(PNC)进行控制。在计算机数控系统中, 一个电子计数器确定旋轮直接按零件图样连续运动的轨迹, 而主轴转速、进给速度和有关其他工艺参数用程序控制, 并可随意变化。这就可使调整时间大大减少, 因而使生产率更大提高。

录返系统则是在旋压过程中由人工改变电位器的电位大小, 再将之转变为电脉冲信号来驱动步进马达。与此同时通过一套电声变换系统, 录音机和磁带把过程的最佳状态录制下来。在使用时播放该录音磁带, 便可获得旋轮的相应运动轨迹, 重现原始旋压过程。这种控制系统, 既可减轻劳动强度、获得过程最佳化和优质产品。

3. 旋压机普遍系列化, 并开始标准化。

4. 各种旋压方法的互相结合, 以及旋压工艺和其他工艺的配合已是一种普遍的趋势。

5. 同一台旋压设备能进行多种旋压工艺或同其他工艺（如切削、冲压和爆炸成形等）相配合，并能旋制多种规格的产品，而且既能冷旋，又能热旋，既能正旋，又能反旋，也就是已向多能化方向发展。

6. 旋压机越来越大型化和自动化，美国已能提供自动旋压生产线。

7. 随着旋压机的大型化，制品尺寸也不断增大（见表1-3）。

表1-3 几个国家能旋压的最大制品(据已报道资料)

国 别	制品尺寸	筒形件最大直径 (毫米)	封头最大直径 (毫 米)	板材长度和宽度 (毫 米)	坯料最大厚度 (毫米)
美 国		4080	6100	7500×9100	152.4
日 本		—	6800	—	25
西 德		—	5100	—	40
苏 联		—	5500	—	140
法 国		—	—	2400×6200	—
中 国		2000	—	3500×3500×1.8	—
瑞 士		—	7315	—	102

第二节 旋压工艺的特点

旋压是一种综合了锻造、挤压、拉伸、弯曲、环轧、横轧和滚压等工艺特点的少无切削加工的先进工艺。这种工艺方法国外名称繁多，大都因强调某一个方面而命名。为了统一技术术语和反映这种加工方法的共性，我们还是采用我国传统说法，将这种工艺称为“普通旋压”和“强力旋压”（或变薄旋压），统称为“旋压”。旋压加工用的机械设备，称为“旋压机”或“旋压机床”，将其划入金属压力加工设备类。

旋压工艺有如下显著特点：

1. 在旋压过程中，旋轮（或钢球）对坯料逐点压下，近似点接触，因此接触面积小，单位压力可达250~350公斤力/毫米²以上，适于加工高强度难变形材料，而且，所需总变形力较小，从而使功率消耗也大大降低。例如，旋压 $\phi 1800$ 毫米管子，旋轮的压力为33吨力，而主传动功率只需110千瓦；旋压 $\phi 3000$ 毫米管子时，所需功率只有150千瓦。然而，在周期式轧管机上轧制 $\phi 200$ 毫米管子，则需功率达500千瓦左右。

2. 坯料的金属晶粒在三向变形力（切向变形力、径向变形力和轴向变形力）的作用下，沿变形区滑移面错移。晶粒的伸长随着变形量增加而增加（图1-1）。滑移面各滑移层的方向与变形方向十分一致，因此，金属纤维保持连续完整（图1-2）。由于金属晶格结构中的应变，旋压制品的强度提高，即制品硬度、抗拉强度 σ_b 和屈服极限 σ_s 增加。

图1-3是St50号钢旋压前后的晶格结构。旋压前后的晶格结构表示晶界上有铁素体（白色）。旋轮以20°的接触角旋压后，具有约70%铁素体的晶格结构大大延伸，使得铁素体界面不能识别，但珠光体界面非常明显。由于冷成形，抗拉强度由原来的50公斤力/毫米²增加到85公斤力/毫米²。这就表示材料大大加工硬化。

图1-4是接触角为20°的旋轮旋压纯铜后（壁厚减薄率为61%时）的晶格结构。由于冷成形，维氏硬度由70公斤力/毫米²增加到135~140公斤力/毫米²。

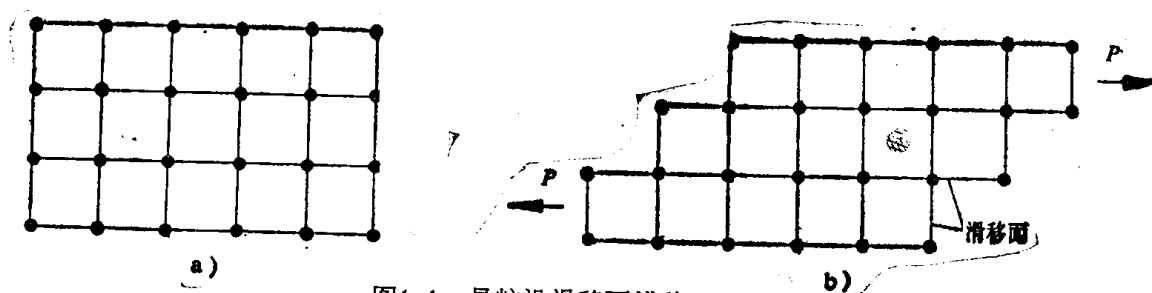


图1-1 晶粒沿滑移面错移
a) 塑性变形前 b) 塑性变形后

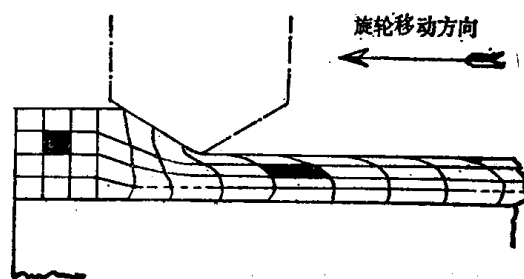
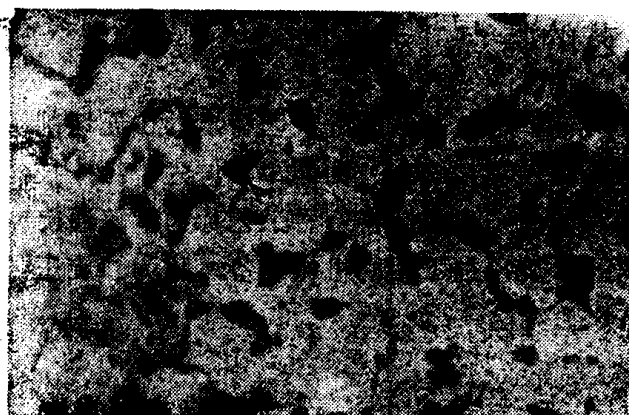
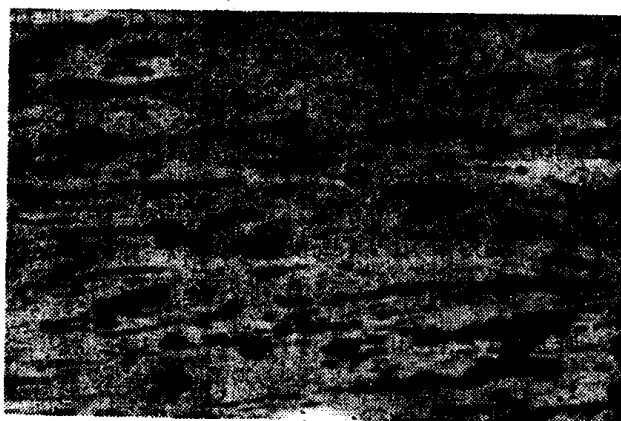


图1-2 旋压中金属塑性流动



a)



b)

图1-3 St50号钢旋压前后的晶格结构
a) 旋压前 b) 旋压后

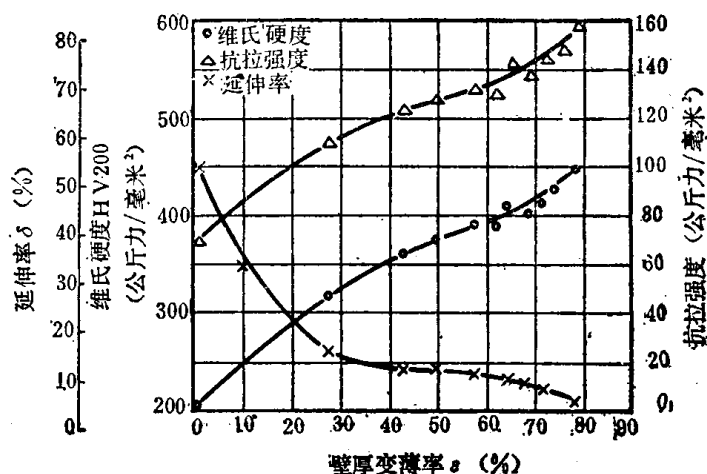


图1-4 纯铜旋压前后的晶格结构(400X)
a) 旋压前 b) 旋压后

图1-5是0Cr18Ni9钢旋压后壁厚减薄率和机械性能的关系曲线。由图可见，随着壁厚减薄率的增加，硬度和抗拉强度增加，而延伸率减小。

根据对铜旋压件硬度测定结果可知：在开始变形处硬度的增加率是最高的，而且，由于主要变形发生在变薄部分的外层，所以靠近旋轮接触面的区域硬度值比靠近芯模接触面的区域的硬度值大（图1-6和图1-7）。铜的硬度约提高45%，减薄率达43%。若减薄率相同，则旋压件硬度增加量和轧制件硬度增加量大致相同。

表1-4是三种材料旋压前后性能变化情况。表1-5是材料为4301号和4300号钢的锥形件在不同试验条件下旋压前后的硬度变化情况。由此表可以看出，旋压后零件的硬度增加一倍多。



0Cr18Ni9钢旋压后减薄率和其机械性能的关系

综上所述，金属旋压后，其机械性能大大提高了。

3. 强力旋压可使制品达到较高的尺寸精度和表面光洁度（见表1-6和表5-28~表5-33）。

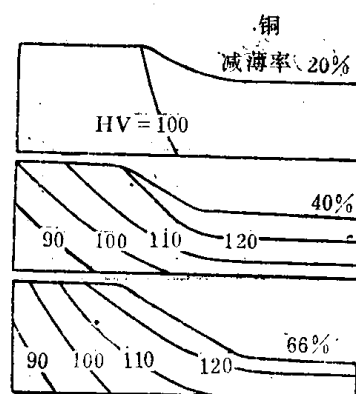
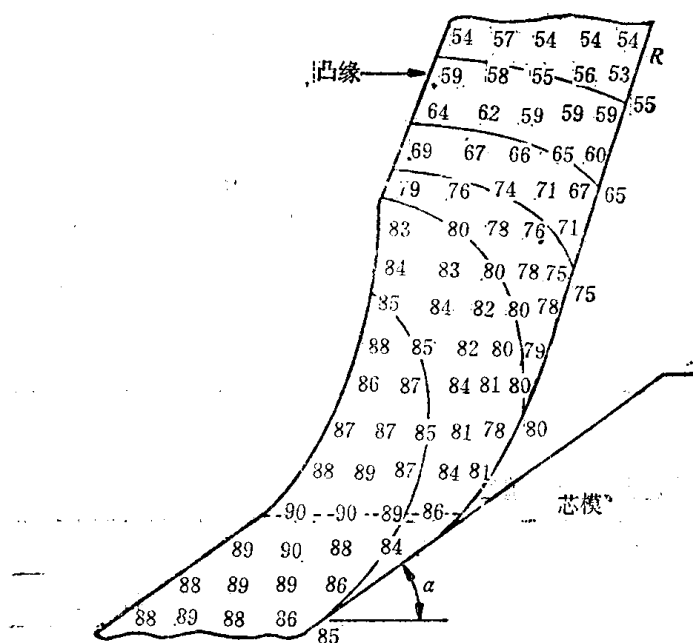


图1-6 用等硬度线表示的锥形铜旋压件硬度分布 图1-7 铜管坯旋压件等硬度线(维氏硬度HV)

由于在旋压过程中，旋轮不仅对被旋压的金属有压延的作用，而且还有整平的作用，因此制品表面光洁度高，一般可达 $\nabla 5 \sim 6$ ，最好的可达 $\nabla 8 \sim 9$ ，经过多次旋压可达 $\nabla 10$ 。

图1-8是西德黑尔曼(I.L.Hermann)试验得出的尖圆锥形件的表面光洁度，由图可知，表面算术平均光洁度为0.24微米，但是可达到的平均光洁度为0.02微米以下。

图1-9是圆筒形件旋压终了时内外表面的形状。由图可知，其内外表面的微观形状都是

表1-4 三种材料旋压后性能的变化

材 料		0Cr18Ni9 钢		20 号 钢				1100 铝	
厚 度 (毫 米)		6.4		6.4		12.7		12.7	
旋 轮 安 装 角 β		85°	21°	85°	21°	85°	21°	85°	21°
抗拉强度 (公斤力 /毫米 ²)	旋 前	61	61	36	36	33	33	9.1	9.1
	旋 后	120	120	55	60	66	66	17.5	16.4
50.8毫米试 件的延伸率 (%)	旋 前	65~70	65~70	42	42	45	45	45	45
	旋 后	7	6	6	4	6	6	9	9
硬 度 HRA	旋 前	50	50	39	39	37	37	58	58
	旋 后	外	68	68	48	50	61	50	78
		内	68	68	50	48	48	51	84

注 试验条件：用板材旋压成锥形件。

半锥角 $\alpha/2=21^\circ$ ，单旋轮，进给量0.76毫米/转，采用冷却和润滑，旋轮圆角半径 $r_p=12.7$ 毫米。

表1-5 不同试验条件下两种钢锥形件旋压前后硬度的变化

芯模锥角 α	减 薄 率 (%)	原始厚度 (毫米)	最终厚度 (毫米)	主轴转速 (转/分)	进给速度 (毫米/分)	旋轮半径 (毫米)	材 料 牌 号	硬 度	
								旋 压 前	旋 压 后
12°	78.2	2.0	0.41	412	100	3.75	4301	165	445
15°	74.1	1.03	0.28	1084	240	6	4301	168	426
16.5°	71.6	1.27	0.36	542	140	3	4301	170	412
18°	69.1	1.25	0.38	552	260	4	4301	160	400
20°	65.8	2.03	0.70	542	100	3	4300	180	410
22°	62.6	1.20	0.45	1084	200	4	4301	160	384
25°	57.75	1.25	0.52	542	180	3.5	4301	190	389
30°	50	1.30	0.65	492	120	2	4301	170	375
35°	42.7	1.0	0.57	1084	280	5	4301	168	360
46.5°	27.5	1.0	0.72	1084	280	3	4301	—	320

表1-6 一般能达到的旋压精度

直 径 (毫米)	厚 度 精 度 (毫 米)	
	商 业 性 产 品 精 度	航 天 专 用 件 精 度
<610	$\pm 0.39 \sim 0.79$	$\pm 0.0254 \sim 0.127$
610~914	$\pm 0.79 \sim 1.19$	$\pm 0.127 \sim 0.254$
914~1919	$\pm 1.19 \sim 1.5$	$\pm 0.254 \sim 3.81$
1919~1829	$\pm 1.5 \sim 2.38$	$\pm 3.81 \sim 0.508$
1829~2438	$\pm 2.38 \sim 3.17$	$\pm 0.508 \sim 0.435$
2438~3048	$\pm 3.17 \sim 3.9$	$\pm 0.435 \sim 0.762$
3048~3408	$\pm 3.9 \sim 4.7$	$\pm 0.762 \sim 1.016$

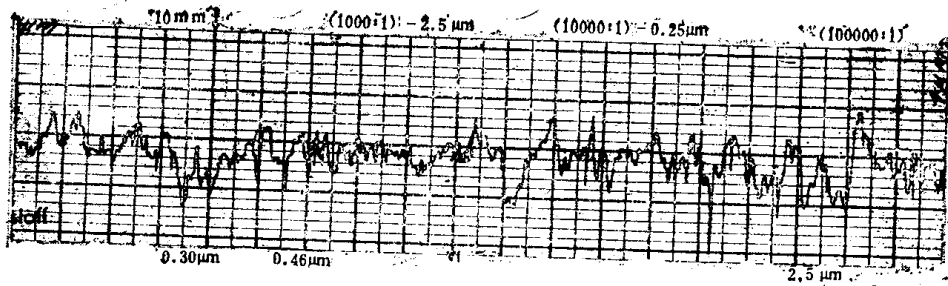


图1-8 尖圆锥形件表面光洁度

波浪状的，波浪的大小和形状取决于旋轮顶端的形状和进给速度，波高一般为3-5微米。内外表面的波高和波长大致相同，但内表面的光洁度比外表面差，这是由于内表面和芯模接触，一方面承受旋轮的压力，一方面滑动，而外表面除旋轮与其接触的微小面积外都是自由表面。

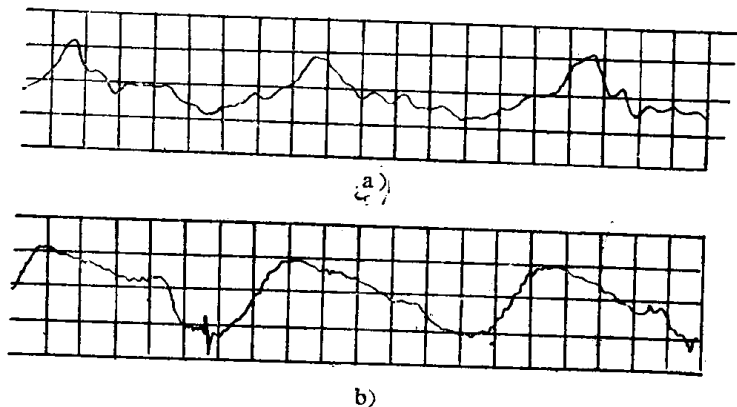


图1-9 旋压的圆筒形件的表面形状

a) 外表面 b) 内表面

4. 制品范围广，能旋压其他工艺难以成形的零件，如火箭、导弹和卫星的鼻锥与壳体；潜水艇渗透密封环和鱼雷外壳；雷达反射镜和探照灯外壳；喷气发动机整流罩和原动机零件；液压缸、压气机外壳和圆筒；涡轮轴、喷管、电视锥、燃烧室锥体和波纹管；干燥机、搅拌机和洗涤机的转筒；浅盘形、盘形、半球形封头；牛奶罐和家庭用具等，以及超宽度7米左右、长9米左右的板材（即将旋压的大直径管材剖开压平而成）。例如，美国已用此法制成了宽3.6米、长10.8米和宽7.5米、长9.1米、厚度公差为 ± 0.05 毫米的宽板；法国已用此法生产了宽2.4米、长6.2米的宽板。

5. 同一台旋压设备可进行旋压、接缝、卷边、缩颈、精整等加工，因而可生产多种产品。同时产品规格范围大，如一台立式三旋轮旋压机能生产直径为635~2032毫米的管子。

6. 坯料来源广，可采用空心的冲压件、挤压件、铸件、焊接件、机加工的锻件和轧制件以及圆板作坯料；并且，能旋压钛、钼、钨、钽、铌一类难变形的金属及其合金。

7. 在旋压过程中，由于被旋压坯料近似逐点变形，因此，其中任何夹渣、夹层、裂纹、砂眼等缺陷很容易暴露出来。这样，旋压过程也附带起到了对制品的自动检验作用。

8. 旋压是一种少无切削工艺，因此，材料利用率高、省工时、成本低。但是，经济性与批量多少、零件结构、设备和劳动费用有关。表1-7列出四种典型零件用普通方法和强力旋压加工时的成本比较。表1-8列出五种航空零件节约的费用。表1-9列出了一些典型旋压件的技术经济效益。图1-10是旋压件和冲压件经济性的比较。图1-11是冲压和旋压圆锥形件或筒形件时经济性的比较。表1-10是用冲压法和旋压法制造封头的经济性比较。

表1-7 四种典型零件用普通方法和强力旋压加工时的成本比较

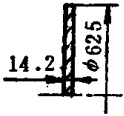
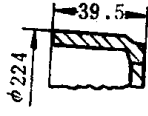
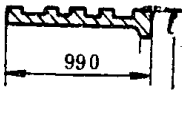
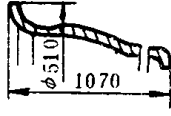
零件名称		隔板	轴	轴	轴承隔板
半成品毛坯	材料和机械				
	加工成本(英镑)	205	120	340	92
旋压成品	材料机械				
	加工和旋压成本(英镑)	208	126	350	94
普通锻造	初始成本(英镑)	600	250	1500	168
	生产成本(英镑)	—	250	1100	156
由于降低了机械加工余量进一步节省的机械加工时间(小时)		5	6	14	25

表1-8 五种旋压的航空零件的节约费用

发动机的零件	节约的百分比(%)		
	材料费	机加工费(与普通加工法比)	每台发动机总节约
气动柱塞缸	84.3	—	50
低压压缩机驱动轴	50.7	66.7	54.3
高压压缩机驱动轴	15.9	30.5	18.4
后法兰定子支持锥	17.7	42.2	20.8
涡轮轴承座的隔板	41.0	45.5	41.4

表1-9 一些典型零件的技术经济效果

零件名称	零件结构	材料	原来的成形方法	旋压毛坯尺寸	旋压成品尺寸(重量)	材料利用率(%)	工时节约	成本节约	采用的旋压设备
J-79发动机的涡轮轴	锥形轴	A-286	锻一切削毛坯重195公斤 材料利用率: 15%	142公斤 锻造空心件	长635毫米	比锻造提高 27%	几十倍 (每根只需 3分45秒)	40%	Hufferd型 60"×60" 立式旋压机
涡轮轴(英国)	圆筒轴	不锈钢	锻→机加工	φ222.2×39.37毫米	φ215.9×984毫米	—	6小时	50%	42"×50" 卧式旋压机
高压压气机轴(英国)	缩颈空心轴	不锈钢	锻→机加工毛坯重675公斤	重157公斤	φ500×1000毫米	—	14小时	77%	Cincinnati 42"×50" 旋压机
涡轮承力架	锥形结构	AMS6322 合金钢	锻→机加工	φ503×34.8×8.9 扁平锻件	φ503×110×2.3毫米	—	比锻造节约三个人的工时	18美元	Floturn40 旋压机
燃烧室衬套	头部为锥形结构	因康镍尔	两半板材 弯曲对焊	厚1.9毫米 板材	φ70×143毫米	—	40%并省10道工序	—	Floturn40 旋压机

(续)

零件名称	零件结构	材 料	原来的成形方法	旋压毛坯尺寸	旋压成品尺寸(重量)	材 料 利 用 率 (%)	工时节约	成本节约	采用的旋压设备
发动机后轴承支座	锥体结构	不 锈 钢	锻→机加工毛坯重24.9公斤材料利用率: 14%	$\phi 40.8 \times 45 \times 9.5$ 毫米扁平锻件重10.4公斤	重量3.6公斤	34%	—	—	—
压气机后轴承支座	锥体结构	AM5613 不 锈 钢	锻→机加工毛坯重22.3公斤4小时完成	扁平锻件最大外径 $\phi 380$ 毫米, 锥角 $\alpha = 90^\circ$, 最大壁厚6.2毫米重12公斤	锥角 $\alpha = 28^\circ$ 壁厚2.8毫米	45%	旋压只需5分钟, 机加工只需1小时, 省20道工序	—	Hydrospin 42 旋压机 Floturn 40 旋压机
TF39压气机盘	鼓盘式结构 (共16级)	Ti-6Al-4V 钛 合 金	锻→切削毛坯重315公斤	—	重 量 117公斤	—	—	50%以上	42" × 50" 强力旋压机
"大力神"导弹鼻锥	锥 形	6061-T6 铝 合 金	—	$\phi 457 \times 12.7$ 毫米平板	$\phi 76.2 \sim 230 \times 865 \times 1.58 \sim 3.18$ 毫米	—	—	33%	Hydrospin 60 旋压机

表1-10 冲压和旋压薄壁封头时经济性比较

项 目		在P233型压力机上冲压	在旋压机上旋压 (最大加工直径为1200毫米)
制造一个封头的额定工时	(小时)	0.23	0.3
机器台数	(台)	1	1
两班制工作时所需工人人数	(个)	10	2
设备占地面积	(米 ²)	132	25
额定功率	(千瓦)	280	22
设备重量	(吨)	337	9
模具更换件的平均重量	(吨)	8	0.23
设备费用	(千卢布)	≈ 224	≈ 100
模具更换件每吨平均费用	(卢布)	700	1500
模具每套更换件的费用	(卢布)	5600	345
模具更换件的套数	(套)	2	3

表1-10是根据年产17000个 $\phi 800 \sim 1500 \times 14$ 毫米各种封头的生产大纲制定的。旋压一个封头所需的工时包括旋压后边部修整的时间。

如图1-10所示, 随着批量的增加 (特别是对于高度和直径比小的光滑的圆筒形件), 深拉深零件的成本比旋压零件的成本大大降低, 但当批量为800~1000个时, 深拉深模的成本很高, 采用旋压经济合算。而且, 安排零件生产所需时间, 深拉深比旋压时多几倍。

如图1-11所示, 生产9000件以上圆锥形件时, 两种方法生产零件的成本大致相等; 生产9000件以下圆锥形件时, 旋压法较经济 (图1-11 a)。但生产800件以上圆筒形件时, 深拉深较经济; 生产800件以下圆筒形件时, 旋压法较经济 (图1-11 b)。

事物总是一分为二的, 金属旋压也具有如下缺点:

1. 除了圆筒形、圆锥形、椭圆形等薄壁回转体零件外, 其他复杂形状的零件用旋压法生产往往是不经济或难以加工的, 而且, 旋压的坯料厚度不能太大, 其极限尺寸见表1-11。
2. 需大批生产的简单零件用旋压法比用冲压法生产效率低, 因而成本高 (参见图1-10)